

**COORDINACIÓN AUTOMÁTICA DE PROTECCIONES DE DISTANCIA EN
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE A UNA CONTINGENCIA EXTREMA**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
COORDINACIÓN AUTOMÁTICA DE PROTECCIONES DE DISTANCIA EN
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE A UNA CONTINGENCIA EXTREMA**

**AUTOR:
RODRIGO XAVIER PELAES RAMÍREZ**

**DIRECTOR:
ALEX DAVID VALENZUELA SANTILLÁN**

Quito, Febrero 2019

Rodrigo Xavier Pelaes Ramírez

**COORDINACIÓN AUTOMÁTICA DE PROTECCIONES DE DISTANCIA
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE A UNA CONTINGENCIA
EXTREMA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador
2019

Breve reseña histórica e información de contacto.



Rodrigo Xavier Pelaes Ramírez (Y'1993 – M'03). Realizó sus estudios secundarios en la Colegio Técnico Salesiano “Don Bosco” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su campo de interés se encuentra relacionado con protecciones eléctricas y planificación de sistemas de transmisión. Su trabajo se basa en la coordinación de protecciones de distancia para un sistema de transmisión. rpelaesr@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alex David Valenzuela Santillán (Y'1989 – M'12). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en diciembre 2013, Además realizó estudios de maestría en Newcastle University en el Reino Unido, donde obtuvo el título en Power Distribution Engineering MSc. Actualmente es profesor ocasional tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. avalenzuela@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
©2019 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO – ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Alex David Valenzuela Santillán declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Coordinación automática de protecciones de distancia en líneas de transmisión frente a una contingencia extrema*” realizado por Rodrigo Xavier Pelaes Ramírez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Febrero 2019



.....
Alex David Valenzuela Santillán


CI: 172184864-4

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Rodrigo Xavier Pelaes Ramírez, con documento de identificación N° 172238866-5, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *“Coordinación automática de protecciones de distancia en líneas de transmisión frente a una contingencia extrema”*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Febrero 2019



.....
Rodrigo Xavier Pelaes Ramírez

CI: 172238866-5

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	IV,V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VI
RESUMEN	1
ABSTRACT	1
1 Introducción	2
2 Marco teórico	4
2.1 Análisis de fallas	4
2.1.1 Fallas simétricas	4
2.1.2 Fallas asimétricas	4
2.2 Medición de voltaje y corriente	4
2.2.1 Transformador de corriente	5
2.2.2 Transformador de potencial	5
2.3 Relés de distancia	5
2.3.1 Relés de impedancia	5
2.3.2 Relés de reactancia	5
2.3.3 Relés de admitancia	5
2.3.4 Relé de protección poligonal	6
2.4 Impedancia aparente vista por el relé	6
2.5 Criterios de ajuste relés de distancia	6
2.5.1 Zonas de protección	6
2.5.2 Tiempos de operación	7
2.6 Efecto infeed	7
3 Planteamiento del problema	7
3.1 Pseudocódigo	7
3.2 Metodología de solución	8
3.2.1 Contingencia extremas	8
3.2.2 Ajustes relés de distancia	8
3.2.2.1 Ajuste zona 1	8
3.2.2.2 Ajuste zona 2	8
3.2.2.3 Ajuste zona 3	9
3.2.3 Simulación de cortocircuitos	9
4 Caso de estudio	9
4.1 Coordinación inicial para el sistema de transmisión	10
4.2 Escenario 1	11
4.3 Escenario 2	12

5	Análisis de resultados	13
6	Conclusiones.....	17
7	Trabajos futuros	17
8	Referencias.....	17
9	Matriz estado del arte.....	20
9.1	Resumen de indicadores	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Coordinación automática de las protecciones de distancia ante una contingencia.....	3
Figura 2. Diagrama tipos de fallas	4
Figura 3. Zonas de protección relé de impedancia.. ..	5
Figura 4. Zonas de protección relé de reactancia.. ..	5
Figura 5. Zonas de protección relé de admitancia	6
Figura 6. Zonas de protección relé poligonal.. ..	6
Figura 7. Zonas de protección relé de distancia.. ..	7
Figura 8. Efecto infeed.	7
Figura 9. Impedancia aparente vista por el relé ante fallas en nodos remotos.	9
Figura 10. Sistema New England 39 barra, condiciones iniciales.....	11
Figura 11. Sistema New England 39 barra, escenario 1	12
Figura 12. Sistema New England 39 barra, escenario 2.....	13
Figura 13. Impedancia vista por los relés ante una falla, escenario 1	15
Figura 14. Impedancia vista por los relés ante una falla, escenario 2	16
Figura 15. Resumen e indicador de la temática- Estado del arte.....	24
Figura 16. Indicador de formulación de problema- Estado del arte	24
Figura 17. Indicador de solución- Estado del arte	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclatura	4
Tabla 2. Ajustes relés de distancia condiciones iniciales 1	10
Tabla 3. Ajustes relés de distancia condiciones iniciales 2	10
Tabla 4. Ajustes relés de distancia del escenario 1.....	11
Tabla 5. Ajustes relés de distancia del escenario 2.....	12
Tabla 6. Impedancias vistas por el relé, escenario 1	13
Tabla 7. Impedancias vistas por el relé, escenario 2	13
Tabla 8. Matriz estado del arte.	20,21,22,23

COORDINACIÓN AUTOMÁTICA DE PROTECCIONES DE DISTANCIA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE A UNA CONTINGENCIA EXTREMA

RESUMEN

Este artículo propone la coordinación automática de protecciones de distancia en un sistema de transmisión, después de una contingencia extrema. El objetivo de la coordinación automática es reestablecer la sensibilidad, selectividad y confiabilidad de las protecciones de distancia. Primero se realiza la coordinación de protecciones de distancia en un sistema de transmisión en condiciones iniciales, después se plantea dos escenarios distintos en los cuales acontece una contingencia extrema, que ocasiona la indisponibilidad de varios elementos del sistema, debido a ello, las corrientes de cortocircuito del sistema varían y el sistema de transmisión adopta una nueva topología, por lo tanto se recalcula automáticamente el ajuste de las protecciones de distancia. Como resultado de la coordinación automática, las protecciones de distancia se encuentran listas para actuar en caso de existir una falla en el sistema de transmisión. Los algoritmos fueron desarrollados mediante los softwares MATLAB y PowerFactory, y se aplican a un sistema eléctrico de potencia de 39 barras propuesto por IEEE.

Palabras Clave: Sistema de transmisión, Coordinación automática, Protecciones de distancia.

ABSTRACT

This article proposes the automatic coordination of distance protection in a transmission system after an extreme contingency. The goal of an automatic coordination is to restore the sensitivity, selectivity and reliability of the distance protections. First a coordination of distance protections is made in a transmission system in initial conditions. Then two different scenarios are proposed, in the two scenarios there is an extreme contingency, the extreme contingency causes the unavailability of several elements of the system, due to the unavailability of elements of the system, the short-circuit currents change in the system and the transmission system adopts a new topology, therefore the adjustment of the distance protections is automatically recalculated. As a result of the automatic coordination, the distance protections are ready to act if there is a fault in the transmission system. The algorithms were developed in MATLAB and PowerFactory softwares, and they are applied to an electric power system of 39 nodes proposed by the IEEE.

Keywords: Transmission system, Automatic coordination, Distance protections.

1 Introducción

Un sistema eléctrico de potencia convencional está compuesto básicamente por tres subsistemas: generación, transmisión y distribución; cuyo objetivo es suministrar energía eléctrica a usuarios comerciales y no comerciales, con niveles admisibles de calidad, confiabilidad y seguridad[1][2][3]. El sistema de transmisión tiene un alto índice de fallas, debido a que se encuentra a la intemperie [2]; por lo tanto, se instala relés de distancia en los extremos de las líneas de transmisión, con el objetivo de detectar, despejar y aislar las fallas en las zonas afectadas[2][3][4].

El funcionamiento de los relés de distancia se basa en la impedancia de las líneas de transmisión, mediante la relación entre el voltaje y la corriente; medidos por los transformadores de potencial o TP's y los transformadores de corriente o TC's. El relé de distancia opera en caso que el valor de impedancia medido sea menor al valor de impedancia preestablecido en el relé[5][6]. El método de protección de los relés de distancia está basado generalmente en tres zonas, las cuales son configuradas para actuar en tiempos diferentes[2][4][5]. En la primera zona el tiempo de actuación del relé de distancia es instantáneo, mientras que en las zonas 2 y 3, el tiempo de actuación es más lento puesto que son zonas de protección de respaldo[6][7].

La superposición de las zonas de protección pueden reducir el nivel de selectividad de los relés de distancia ocasionando una incorrecta coordinación de protecciones de distancia[8], para solucionar este inconveniente se puede retardar los tiempos de actuación de los relés de distancia en las diversas zonas, sin embargo, al retardar los tiempos de actuación de los relés de distancia implica un aumento en el tiempo de despeje de la falla; lo que ocasiona que

la sensibilidad de las protecciones de distancia disminuya[9].

La presente investigación ha sido realizada basándose en diversos estudios de coordinación de protecciones de distancia en líneas de transmisión que plantean algoritmos que permiten calcular las impedancias de ajuste; tanto en la zona primaria como en las zonas de respaldo, como se muestra a continuación.

El artículo [11] plantea el cálculo de las impedancias de ajuste en las zonas 2 y 3, durante una falla en el sistema de transmisión, utilizando métodos de búsqueda. Esta metodología permite realizar una coordinación automática de protecciones de distancia, sin que exista superposición en las diferentes zonas de protección, con el fin de garantizar la sensibilidad, selectividad y confiabilidad en las protecciones de distancia de las líneas de transmisión[3].

El artículo [10] propone un método para calcular el ajuste de impedancia en la zona 2 del relé de distancia; el método propuesto no causa problemas de coordinación de protecciones, y se basa en la impedancia vista por el relé de distancia cuando se simula una falla en el alcance de la zona 1 del relé primario, para la mínima y máxima potencia de generación en el sistema eléctrico.

Debido a que la topología del sistema eléctrico puede variar ya sea debido a mantenimientos o fallas en el sistema de transmisión, en el artículo [5] se realiza la automatización de la coordinación de protecciones de distancia en caso de existir un cambio de topología en el sistema, esta automatización permite reducir los cálculos computacionales, mediante el aislamiento de la zona afectada, debido al cambio de topología.

En el artículo [11], se plantea un algoritmo que permite calcular el tiempo apropiado de actuación de los relés de distancia, en las diferentes zonas de protección; este método se basa en un árbol probabilístico, que permite

despejar oportunamente las fallas en el sistema de transmisión.

En cuanto se refiere al problema de superposición de zonas de protección, el artículo [6] propone un método eficiente que permite configurar automáticamente, las impedancias de ajuste en relés de distancia, de forma efectiva.

Respecto a la coordinación de protecciones de distancia en sistemas de transmisión de extra alto voltaje, el artículo [12] propone un modelo basado en máquinas de soporte vectorial.

Oscilaciones de potencia pueden ocasionar una incorrecta operación en las protecciones de distancia[13][14]; el

artículo [15] plantea una rápida y práctica metodología usando mediciones locales, que permiten que el relé de distancia no actúe en caso de que acontezca una oscilación de potencia en la zona 3 de protección. Al igual que las oscilaciones de potencia, las fluctuaciones severas de voltaje, pueden ocasionar una mala operación de las protecciones de distancia en la zona 3; el artículo [16] propone un algoritmo de ajuste adaptivo en relés de distancia, basado en un ajuste dinámico en la zona 3, para evitar una mala operación de las protecciones de distancia, en caso de que ocurra una variación severa de voltaje.

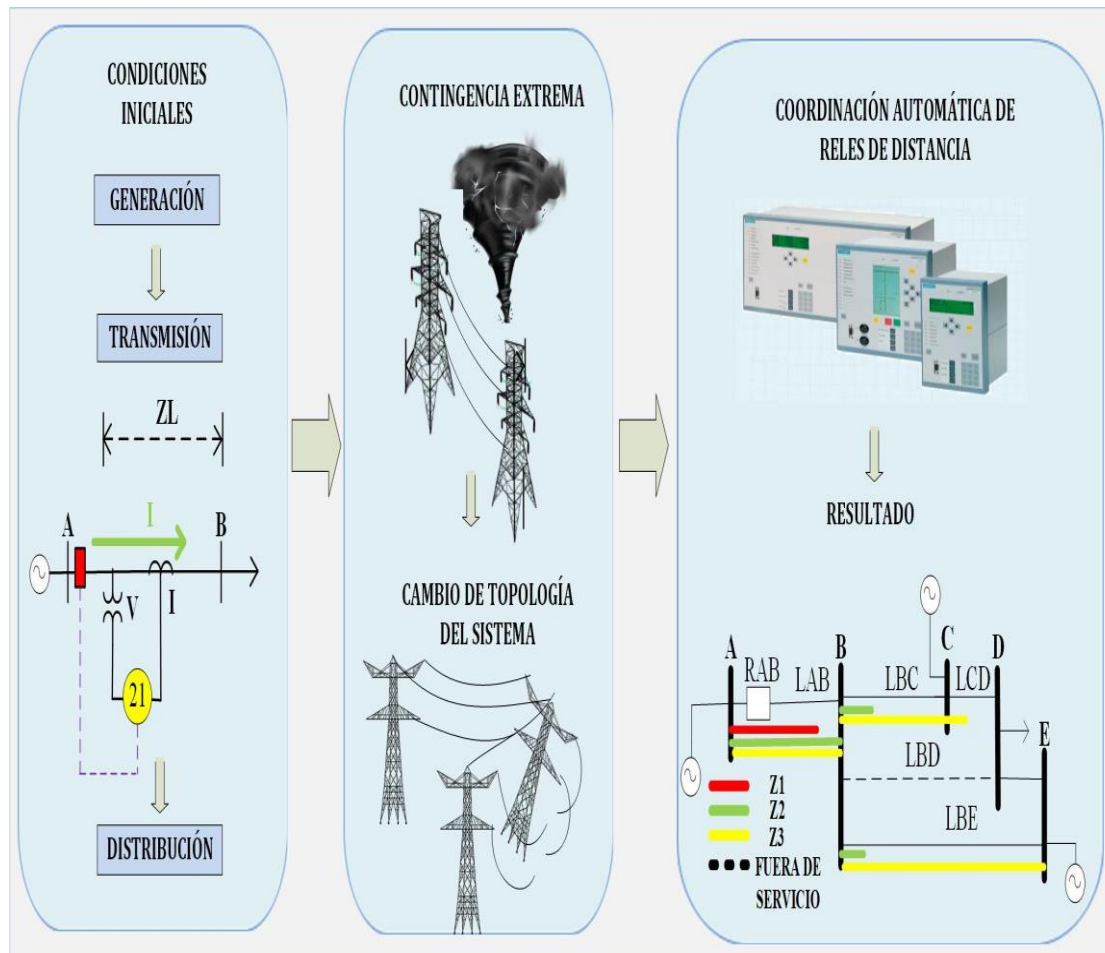


Figura 1. Coordinación automática de las protecciones de distancia ante una contingencia

Tabla 1. Nomenclatura

Nomenclatura	
k_0	Factor de compensación
Z_{AB}	Impedancia secuencia positiva
RTC	Relación transformación TC
I_p	Corriente del primario
I_s	Corriente del secundario
RTP	Relación transformación TP
V_p	Voltaje del primario
V_s	Voltaje del secundario
\emptyset	Fase
GND	Tierra
$Z1(R_{AB})$	Ajuste impedancia zona 1
$K1$	Constante zona 1
Z_{ab}	Impedancia secuencia positiva línea de transmisión AB
$Z2(R_{AB})$	Ajuste impedancia zona 2
$k2$	Constante zona 2
$Z_a(R,C)$	Impedancia aparente nodo C
$Z3(R_{AB})$	Ajuste impedancia zona 3
$k3$	Constante zona 3
$Z_a(R,D)$	Impedancia aparente nodo D
n_{lin_out}	Nº de líneas fuera de servicio
n_{lines}	Nº de líneas del sistema
n_{bus}	Nº de barras
$n_{relés}$	Nº de relés
l_{out_ser}	Líneas fuera de servicio
$V(i)$	Matriz de voltajes
$I(i)$	Matriz de corrientes
VBn	Voltaje barra n
ILn	Corriente línea n
$Vdist_max$	V línea adyacente más larga
$Vdist_min$	V línea adyacente más corta
$Idist_max$	I línea adyacente más larga
$Idist_min$	I línea adyacente más corta

2 Marco teórico

2.1 Análisis de fallas

Los sistemas eléctricos de potencia están expuestos a fallas, las mismas que interfieren con el flujo normal de corriente, alterando el funcionamiento del sistema eléctrico[8][17]. Las fallas más comunes en el sistema eléctrico son los cortocircuitos, generalmente son ocasionados por vegetación, fenómenos naturales, o por pérdida de aislamiento en los elementos que conforman el SEP[8]. El análisis de corrientes de cortocircuito en el sistema eléctrico es indispensable para realizar una adecuada coordinación de protecciones de distancia[18][19]. La figura 2 muestra la clasificación de los tipos de falla.

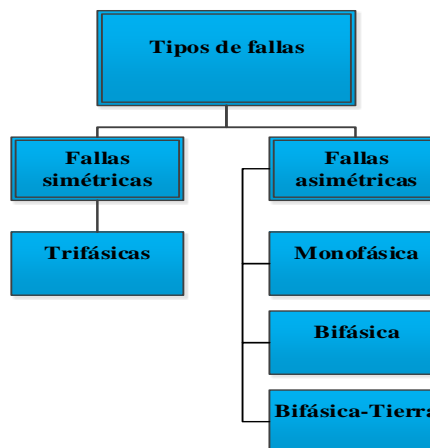


Figura 2. Diagrama tipos de fallas.

2.1.1 Fallas simétricas

Cuando ocurre una falla en un sistema eléctrico en el que intervienen $3\emptyset$ $3\emptyset$ -GND, se considera como una falla simétrica. Las fallas simétricas no ocasionan desbalance de voltaje o corriente entre las fases. Son fallas poco comunes ya que aproximadamente solo en el 5% de las fallas, intervienen las tres fases[2].

2.1.2 Fallas asimétricas

Las fallas asimétricas son aquellas fallas donde intervienen $2\emptyset$, $2\emptyset$ -GND o $1\emptyset$ -GND. Las fallas asimétricas ocasionan un desbalance que produce corrientes desequilibradas en el sistema eléctrico[20].

Para determinar las corrientes de cortocircuito en este tipo de fallas, se utiliza el método de componentes simétricas, es un método que se basa en la descomposición de fasores de secuencia positiva, negativa y cero [20].

2.2 Medición de voltaje y corriente

En un sistema eléctrico de transmisión las magnitudes eléctricas son demasiado elevadas[21], debido a ello se utiliza transformadores que reducen los niveles de corriente y voltaje, con el fin de determinar las magnitudes eléctricas del sistema de transmisión, mediante equipos de medida conectados al bobinado secundario de los transformadores[2][22].

2.2.1 Transformador de corriente

Los transformadores de corriente reducen la corriente del primario, a valores de corriente menores en el lado secundario, con el objetivo de estimar la corriente que circula por las líneas de transmisión, mediante la relación de transformación del TC[24]. La elección del TC para una protección de distancia se realiza en base a la corriente nominal de la línea que será protegida por el relé de distancia[2][25]. La relación de transformación del TC se representa mediante la ecuación (1).

$$RTC = \frac{I_p}{I_s} \quad (1)$$

Dónde:

RTC: Relación del transformador de corriente.

I_p : Intensidad del devanado primario.

I_s : Intensidad del devanado secundario.

2.2.2 Transformador de potencial

El bobinado primario de los transformadores de potencial, se conecta a la red de medio o alto voltaje, mientras que el lado secundario se conecta a los equipos de medida y protección[24]. El voltaje de las líneas de transmisión se estima mediante la relación de transformación del TP, como se describe en la ecuación (2).

$$RTP = \frac{V_p}{V_s} \quad (2)$$

Dónde:

RTP: Relación del transformador de potencial.

V_p : Voltaje del devanado primario.

V_s : Voltaje del devanado secundario.

2.3 Relés de distancia

En líneas de transmisión, los relés de distancia tienen propiedades de mayor rapidez y selectividad, incluso son mayormente inmunes a cambios de generación en el sistema; en comparación a las protecciones de

sobrecorriente. Adicionalmente, las protecciones de distancia cuentan con la ventaja de ubicar el sitio donde ocurrió la falla, puesto que la impedancia de la línea es directamente proporcional a su longitud[4].

Los relés de distancia proporcionan protección a líneas de transmisión, en una zona principal y en zonas de respaldo a líneas adyacentes[23][2].

2.3.1 Relés de impedancia

Son relés utilizados comúnmente para protección de fallas entre fases en líneas de transmisión de longitud media, esta protección no cuenta con la propiedad de direccionalidad; es decir, solo es capaz de detectar fallas en una sola dirección[14]; las zonas de protección del relé de impedancia se muestran en la figura 3.

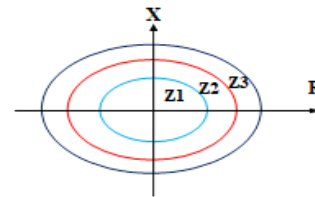


Figura 3. Zonas de protección relé de impedancia.

2.3.2 Relés de reactancia

Las protecciones de distancia tipo reactancia, no dependen de la resistencia de la línea de transmisión, utilizados normalmente para protección de líneas de corta longitud debido a su alta velocidad de operación, ideales para protección de fallas fase-tierra[2]; las zonas de protección del relé de reactancia se muestran en la figura 4.

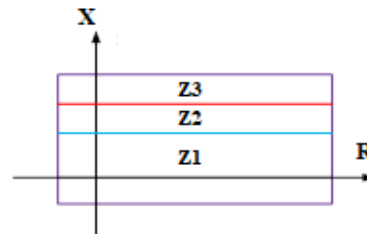


Figura 4. Zonas de protección relé de reactancia.

2.3.3 Relés de admitancia

Conocidos como relés de distancia de tipo Mho, es el relé de distancia más

idóneo para protección de fallas entre fases y oscilaciones de potencia en líneas de transmisión de larga distancia, su alcance de protección es directamente proporcional al diámetro de la circunferencia preestablecido para la zona de operación[23]; las zonas de protección del relé de admitancia se muestran en la figura 5.

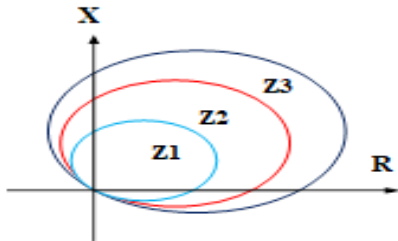


Figura 5. Zonas de protección relé de admitancia.

2.3.4 Relé de protección poligonal

En la actualidad los relés de distancia poligonales son los más utilizados, debido a las ventajas que ofrece su modo de operación. Su principal ventaja es que se puede configurar los valores de resistencia e impedancia de forma independiente, lo que permite cubrir las zonas de protección del relé con mayor exactitud[23]. Este tipo de relé fue utilizado en los casos de estudio de la presente investigación; las zonas de protección del relé de impedancia se muestran en la figura 6.

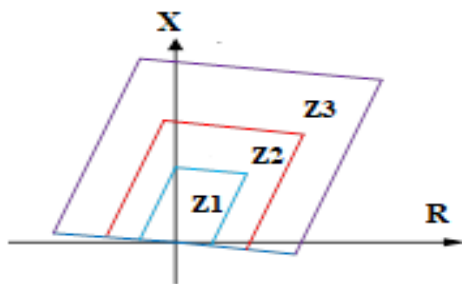


Figura 6. Zonas de protección relé poligonal.

2.4 Impedancia aparente vista por el relé

Los relés de distancia están diseñados para proteger al sistema de potencia de fallas: 3ϕ , 3ϕ -GND, 2ϕ , 2ϕ -GND y 1ϕ -GND. Cada relé de distancia está compuesto por 3 unidades de fase y 3 unidades fase-tierra [4]. Las unidades de

fase de las protecciones de distancia se encargan de detectar fallas 3ϕ y 2ϕ , mediante la medición de la impedancia aparente entre las fases A-B, B-C y C-A[8][21]; mientras que las unidades fase-tierra de los relés de distancia detectan fallas 3ϕ -GND, 2ϕ -GND y 1ϕ -GND; mediante la medición de la impedancia aparente entre la fase A-GND, B-GND y C-GND.

2.5 Criterios de ajuste relés de distancia

Una correcta coordinación de protecciones garantiza que las fallas del sistema eléctrico sean despejadas en el menor tiempo posible, con el fin de salvaguardar los elementos que conforman el SEP [4][26]. Las protecciones de distancia cuentan generalmente con tres zonas de protección, una zona principal y dos zonas de respaldo a líneas de transmisión adyacentes, cada zona tiene un tiempo de operación diferente, las zonas de cobertura y tiempos de operación, se detallan a continuación[2][5].

2.5.1 Zonas de protección

La zona 1 comúnmente protege entre el 80% y 95% de la línea de transmisión, donde está instalado el relé de distancia. La zona 2 protege el 100% de la línea donde se encuentra instalado el relé y mínimo el 20% de la línea adyacente más corta[27][6], se debe tomar en cuenta que el alcance de la zona 2, no debe sobrepasar el alcance de la zona 1 del relé de distancia de la línea adyacente[9]. La zona 3 de protección comúnmente protege el 100% de la línea de transmisión donde está instalado el relé de distancia y el 100% de todas las líneas adyacentes[6][27]. Como se muestra en la figura 7, las 3 zonas de protección del relé R_{AB} , actúan en tiempos diferentes; la zona 1 brinda una protección principal, mientras que las zonas 2 y 3 brindan protección de respaldo[6][9].

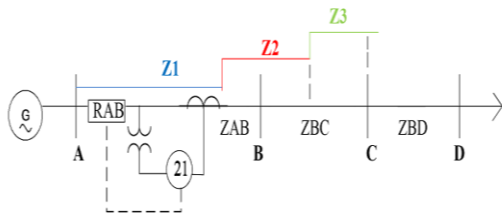


Figura 7. Zonas de protección relé de distancia.

2.5.2 Tiempos de operación

La zona 1 de las protecciones de distancia actúa instantáneamente[6], la zona 2 opera con un retardo de tiempo aproximado entre 0.25 y 0.4 segundos [27][28], la zona 3 opera con un retardo de tiempo entre 0.5 y 1 segundo [27]; las zonas 2 y 3 actúan en caso de que la zona 1 del relé de distancia no opere, o a su vez otro tipo de protecciones como relés de sobrecorriente o direccionales, tampoco actúen [9].

2.6 Efecto infeed

El efecto infeed o también conocido como efecto de fuentes intermedias, ocasiona problemas de sub-alcance o sobre-alcance en las zonas de protección, de los relés de distancia, debido a la contribución de corriente de fuentes intermedias al sitio donde ocurre la falla, como se muestra en la figura 8[29]. Al contrario de las zonas 2 y 3, la zona 1 no presenta problemas de ajuste frente al efecto infeed[30][31]. Para contrarrestar dicho efecto, se puede utilizar medidores sincronizados en ambos extremos de las líneas de transmisión, que permiten proteger al sistema en caso de existir una falla; sin embargo este sistema de protección, representa una gran inversión económica en equipos de comunicación[32]; debido a ello existen metodologías que permiten calcular los ajustes en las zonas 2 y 3 de los relés de distancia tomando en cuenta el efecto infeed[33]. Las metodologías proponen el cálculo de la zonas de ajuste 2 y 3 de los relés de distancia, mediante el cálculo de corrientes de falla de las líneas de transmisión, adyacentes al sitio donde se encuentra instalado el relé[32]. En el

presente caso de estudio, se ha utilizado una metodología que realiza el cálculo de las zonas 2 y 3, basándose en la impedancia de secuencia positiva de la línea de transmisión donde está instalado el relé y la impedancia aparente vista por el relé al ocurrir una fallas en los nodo adyacentes de la línea[27].

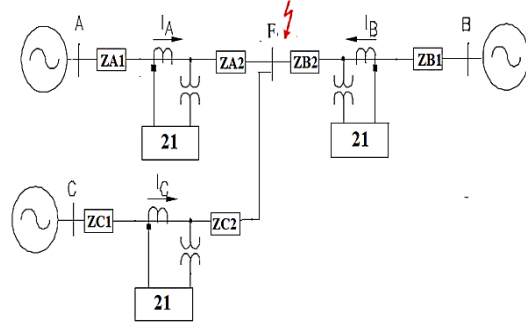


Figura 8. Efecto infeed.

3 Planteamiento del problema

Una contingencia extrema puede originar fallas graves en el sistema eléctrico de transmisión, incluso puede ocasionar que una o varias líneas queden fuera de servicio por varios días, debido al daño mecánico producido en los conductores o torres de transmisión[5][4].

En la figura 1, se muestra los relés de distancia configurados previamente para brindar protección al sistema de transmisión en condiciones iniciales; cuando existe una contingencia extrema que ocasiona la indisponibilidad de una o varias líneas, el sistema de transmisión adopta una nueva topología[5]; sin embargo, los relés de distancia continúan configurados para brindar protección al sistema de transmisión inicial, por ello es indispensable realizar una coordinación automática de protecciones de distancia, con la nueva topología del sistema[7], para proteger al sistema de transmisión de posibles futuras fallas.

3.1 Pseudocódigo

A continuación, se detalla el Pseudocódigo que permite realizar la coordinación automática de protecciones

de distancia. En la tabla 1 se muestra la notación utilizada en el pseudocódigo.

**ALGORITMO 1: COORDINACIÓN AUTOMÁTICA
RELÉS DE DISTANCIA**

Paso 1: Inicio.

Paso 2: Datos de entrada / Datos de salida.

Entrada → $n_{lin_out}, n_{lines}, n_{bus},$
→ $n_{relés}, Z_{AB}, k1, k2, k3.$
Salida → $l_{out_ser}, V(i), I(i), V_{Bn}, I_{Ln},$
→ $Za(R, C), Za(R, D), Z1, Z2, Z3.$

Paso 3: Elementos del sistema fuera de servicio aleatoriamente.

For $i=1:n_{lin_out}$
 $l_{out_ser}(i) = aleatorio(1, n_{lines});$
End

Paso 4: Obtener V e I al simular cortocircuitos en cada barra del sistema en Power Factory.

For $i=1:n_{bus}$
 $V(i) = [V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}, \dots \dots V_{B39}];$
 $I(i) = [I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}, \dots \dots I_{L34}];$
End

Paso 5: Cálculo de la impedancia aparente vista por el relé.

For $i=1:n_{relés}$
 $Za(R, C) = \frac{V_{dist_max}}{I_{dist_max}};$
 $Za(R, D) = \frac{V_{dist_min}}{I_{dist_min}};$
End

Paso 6: Cálculo de las zonas de ajuste para cada relé de distancia.

For $i=1:n_{relés}$
 $Z_1(R_{AB}) = k1 \times Z_{AB};$
 $Z_2(R_{AB}) = Z_{AB} + k2 \times [Z_{RAB}(R, C) - Z_{AB}];$
 $Z_3(R_{AB}) = k3 \times [Z_{RAB}(R, D)];$
End

Paso 7: Comprobación de los ajustes en las 3 zonas mediante cortocircuitos en barras y líneas de transmisión.

Paso 8: Fin.

3.2 Metodología de solución

A continuación, se describe un método que permite realizar la coordinación automática de protecciones de distancia frente a una contingencia extrema.

3.2.1 Contingencia extremas

Con el fin de simular una contingencia extrema, se desconecta aleatoriamente generadores y una o varias líneas de transmisión del sistema. Una vez que el

sistema cambia de topología, debido a la contingencia extrema, mediante programación DPL en el software PowerFactory se simulan cortocircuitos en cada una de las barras del sistema, con el objetivo de exportar a MATLAB los valores de voltajes, corrientes e impedancias que permitirán calcular las zonas de ajuste para cada relé de distancia del sistema.

3.2.2 Ajustes relés de distancia

3.2.2.1 Ajuste zona 1

Por lo general la zona 1 de protección no presenta problemas de sobre-alcance o sub-alcance, ante la presencia de fuentes intermedias o fuentes remotas adyacentes. Para el presente caso de estudio esta zona de protección tiene un alcance aproximado del 80 al 95% de la línea de transmisión donde se encuentra instalado el relé de distancia[27].

$$Z_1(R_{AB}) = k1 \times Z_{AB} \quad (3)$$

Dónde:

$Z_1(R_{AB})$: Ajuste de la zona 1, relé R_{AB} .

$k1$: Constante zona 1.

Z_{AB} : Impedancia de secuencia positiva de la línea de transmisión A-B.

En caso de existir una falla en esta zona el tiempo de actuación del relé de distancia es instantáneo. Para el cálculo de esta zona se utiliza una metodología basada en la impedancia de secuencia positiva de la línea de transmisión Z_{AB} , donde se encuentra instalado el relé, multiplicado por un factor $k1$ igual a 0.9 (90% de la línea), tal como se muestra en la ecuación (3)[11].

3.2.2.2 Ajuste zona 2

El ajuste de la zona 2 de las protecciones de distancia para los presentes casos de estudio, se calculó mediante la ecuación (5)[11], se utilizó una metodología de cálculo basada en la impedancia de secuencia positiva de la línea de

transmisión Z_{AB} , donde está instalado el relé; un factor constante k_2 que se determina mediante la ecuación (4)[27], y la impedancia aparente vista por el relé de distancia $Z_a(R,C)$ al simular una falla en el nodo remoto de la línea adyacente más corta[8][27][10], por ejemplo para el ajuste de la zona 2 del relé R_{AB} de la figura 9, se determina la impedancia aparente vista por el relé, mediante la simulación de una falla en el nodo C, por ser la línea adyacente más corta. El análisis del efecto infeed se encuentra incluido en la impedancia aparente vista por el relé[27].

$$k_2 = 0.9 \times k_1 \quad (4)$$

$$Z_2(R_{AB}) = Z_{AB} + k_2 \times [Z_a(R, C) - Z_{AB}] \quad (5)$$

Dónde:

k_2 : Constante zona 2.

$Z_2(R_{AB})$: Ajuste de la zona 2, relé R_{AB} .

Z_{AB} : Impedancia de secuencia positiva de la línea de transmisión A-B.

$Z_a(R,C)$: Impedancia aparente vista por el relé, cuando se simula una falla en el nodo C.

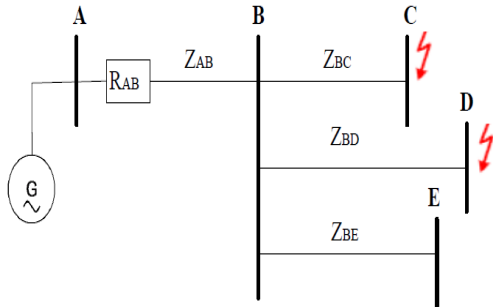


Figura 9. Impedancia aparente vista por el relé ante fallas en nodos remotos.

3.2.2.3 Ajuste zona 3

El ajuste de la tercera zona de protección de los relés de distancia, se calculó mediante la ecuación (6)[11], se utilizó una metodología de cálculo basada en la impedancia aparente vista por el relé $Z_a(R,D)$, al simular una falla en el nodo remoto de la línea adyacente más larga, a la línea donde está instalado el relé de distancia, y un factor constante k_3 igual

a 1.05[27], por ejemplo para el ajuste de la zona 3 del relé R_{AB} de la figura 9, se determina la impedancia aparente vista por el relé, mediante la simulación de una falla en el nodo D, por ser la línea adyacente más larga. El análisis del efecto infeed se encuentra incluido en la impedancia aparente vista por el relé[27].

$$Z_3(R_{AB}) = k_3 \times [Z_a(R, D)] \quad (6)$$

Dónde:

$Z_3(R_{AB})$: Ajuste de la zona 3, relé R_{AB} .

k_3 : Constante zona 3.

$Z_a(R,D)$: Impedancia aparente vista por el relé, cuando se simula una falla en el nodo D.

Los ajustes de las tres zonas de protección para cada relé de distancia, fueron calculados mediante el software MATLAB. Después mediante programación DPL, se importa los resultados de los ajustes de cada zona de protección, a los relés de distancia del sistema que se ha modelado en PowerFactory.

3.2.3 Simulación de cortocircuitos

Una vez realizada la coordinación de protecciones de distancia se procede con la comprobación de los ajustes en las diferentes zonas de protección de los relés de distancia[27]; mediante el software PowerFactory se realiza simulaciones de cortocircuitos trifásicos en barras y líneas de transmisión, con el fin de constatar que los relés de distancia actúen correctamente y no existan problemas de sobre-alcance o sub-alcance[7].

4 Caso de estudio

Con el objetivo de implementar los algoritmos desarrollados, se utilizó un sistema de transmisión de alto voltaje de 39 barras o también conocido como Sistema New England, este sistema es propuesto por la IEEE para caso de

estudio. El sistema está compuesto por 39 barras, 12 transformadores, 10 generadores, 34 líneas de transmisión y 19 cargas. El sistema opera a una frecuencia nominal de 60 Hz y su voltaje principal de operación es 345 kV. En los diferentes escenarios que se utilizó para caso de estudio, se nombró a los relés de distancia y líneas de transmisión, como se muestra a continuación:

Relé 1-2: Relé instalado en la barra 1, con dirección de protección hacia la barra 2.

Línea 1-2: Línea de transmisión ubicada entre la barra 1 y la barra 2.

4.1 Coordinación inicial para el sistema de transmisión

En la coordinación inicial de las protecciones de distancia, todos los elementos que conforman el SEP se encuentran operativos. En la figura 10, se muestra el sistema propuesto para caso de estudio; el ajuste de los relés de distancia ubicados en los extremos de las 34 líneas de transmisión del sistema propuesto, se realizó mediante el procedimiento detallado en la sección 3.1. Con el fin de simplificar el análisis de la coordinación de protecciones, se escogió únicamente 8 relés de distancia; los ajustes de los relés de distancia para el sistema en condiciones iniciales, serán comparados posteriormente con los ajustes de los mismos relés, después de la coordinación automática de protecciones con la nueva topología del sistema, de los diferentes escenarios. En la tabla 2, se muestra los ajustes de las 3 zonas de protección, de los relés de distancia que se encuentran señalados con color rojo en la figura 10; mientras que en la tabla 3, se encuentran los ajustes de las tres zonas de protección de

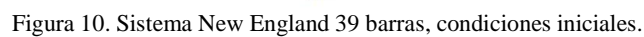
los relés de distancia, que se encuentran señalados con color azul en la figura 10.

Tabla 2. Ajustes relés, condiciones iniciales 1.

AJUSTES RELÉS DE DISTANCIA			
RELÉS	ZONAS	CASO INICIAL	
		R[Ω]	X[Ω]
RELÉ 2-3	1	1,39	16,18
	2	4,86	37,63
	3	6,18	57,56
RELÉ 11-6	1	0,75	8,78
	2	1,40	14,49
	3	4,07	31,81
RELÉ 16-17	1	0,75	9,53
	2	1,89	21,22
	3	6,69	41,70
RELÉ 19-16	1	1,72	20,88
	2	6,42	41,21
	3	18,72	66,06

Tabla 3. Ajustes relés, condiciones iniciales 2.

AJUSTES RELÉS DE DISTANCIA			
RELÉS	ZONAS	CASO INICIAL	
		R[Ω]	X[Ω]
RELÉ 3-4	1	1,39	22,82
	2	2,45	42,27
	3	4,24	50,77
RELÉ 21-22	1	0,86	15,00
	2	4,93	37,41
	3	6,62	44,4
RELÉ 26-27	1	1,50	15,75
	2	3,66	34,03
	3	4,33	39,80
RELÉ 13-14	1	1,01	11,38
	2	8,18	46,03
	3	13,64	60,19



En el primer escenario, con el fin de simular una contingencia extrema, el algoritmo desarrollado en Matlab desconecta aleatoriamente generadores y líneas de transmisión, los elementos del SEP que se encuentran fuera de servicio, para el escenario 1, son los siguientes:

Líneas de transmisión: Línea de transmisión 3-4, línea de transmisión 17-27, línea de transmisión 26-29.

alcances de los relés de distancia a analizar, se muestran en la figura 11, mientras que los valores de los ajustes de cada relé de distancia se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Ajustes relés de distancia del escenario 1.

11

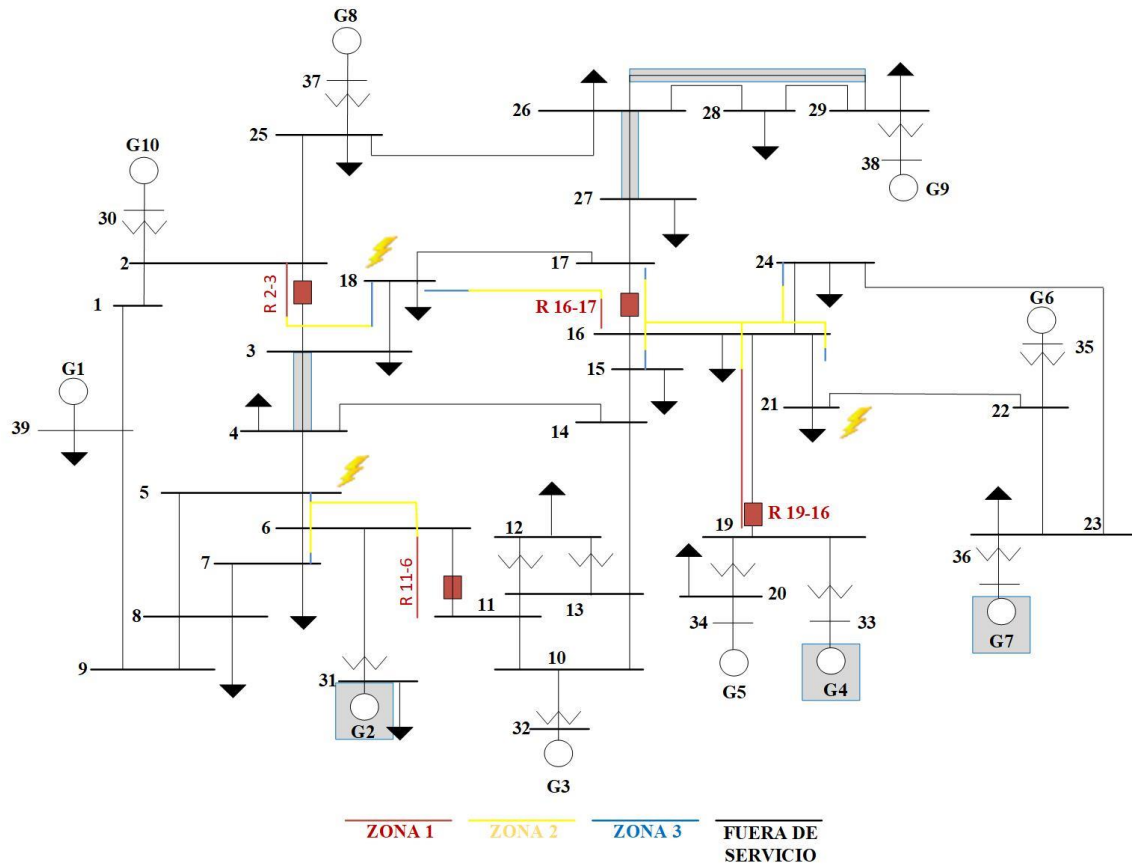


Figura 11. Sistema New England 39 barras, escenario 1.

4.3 Escenario 2

Al igual que el escenario 1, el escenario 2 parte de un sistema en condiciones iniciales, donde se simula una contingencia extrema, desconectando aleatoriamente generadores y líneas de transmisión, los elementos del SEP fuera de servicio son los siguientes:

Generadores: Generador 6, generador 9.

Líneas de transmisión: Línea de transmisión 4-14, línea de transmisión 28-29, línea de transmisión 17-18, línea de transmisión 23-24.

La nueva topología del sistema y los alcances de los relés de distancia a analizar se muestra en la figura 12, mientras que los valores de los ajustes de los relés después de la coordinación automática se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Ajustes relés de distancia del escenario 2.

AJUSTES RELÉS DE DISTANCIA			
RELÉS	ZONAS	CASO INICIAL	
		R[Ω]	X[Ω]
RELÉ 3-4	1	1,39	22,81
	2	3,23	37,29
	3	3,81	42,10
RELÉ 21-22	1	0,86	15,00
	2	1,54	26,01
	3	1,76	29,61
RELÉ 26-27	1	1,50	15,74
	2	3,78	33,96
	3	4,49	39,71
RELÉ 13-14	1	0,96	10,82
	2	2,84	33,15
	3	3,42	40,01

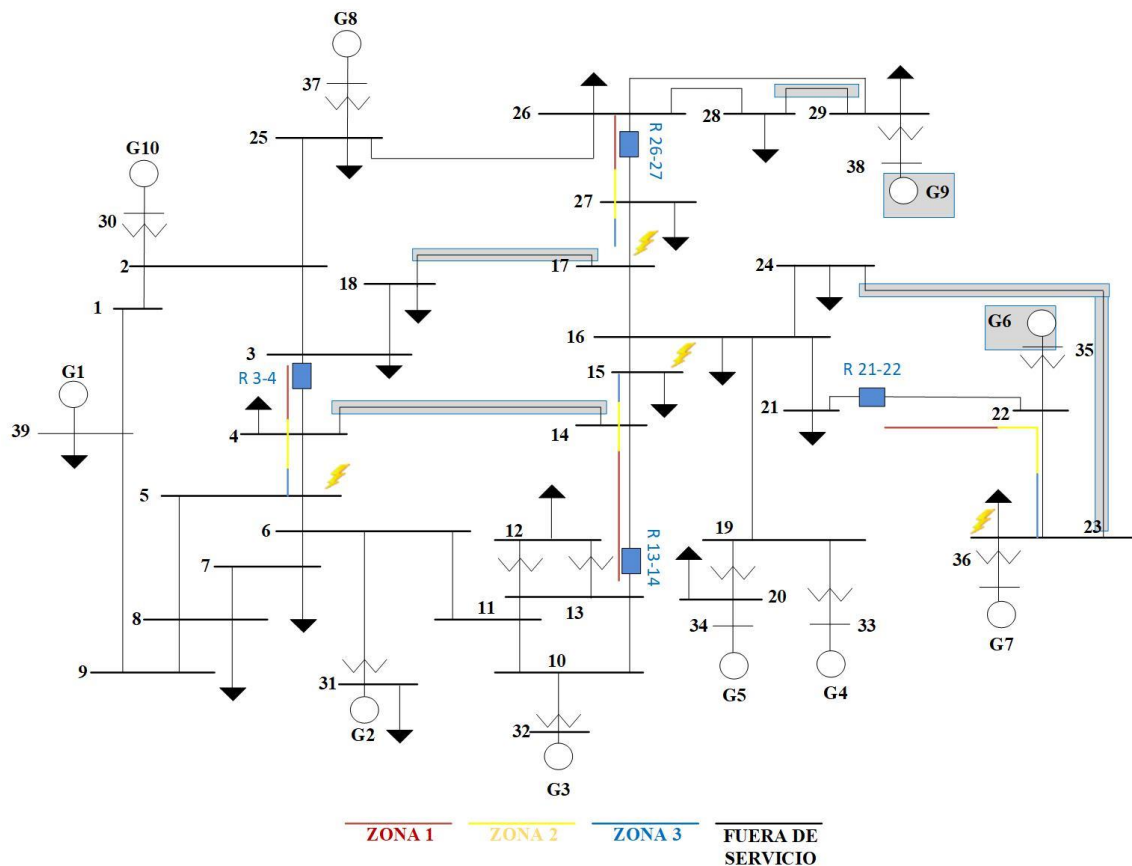


Figura 12. Sistema New England 39 barras, escenario 2.

5 Análisis de resultados

El análisis de resultados se realizó comparando el sistema de transmisión propuesto en condiciones iniciales, con los escenarios 1 y 2, donde en los diferentes escenarios la topología del sistema cambia, puesto que varios elementos del SEP se encuentran fuera de servicio, debido a una contingencia extrema. En las tablas 6 y 7 se muestra, como la impedancia vista por el relé, varía al simular una falla trifásica en el sistema de transmisión en condiciones iniciales y en las nuevas topologías de los escenarios 1 y 2, las fallas se simularon en la barras de la línea adyacente a la línea donde se encuentran instalados los relés de distancia.

Tabla 6. Impedancias vistas por el relé, escenario 1.

IMPEDANCIA VISTA POR EL RELÉ					
RELÉ	LUGAR FALLA	CASO INICIAL		ESCENARIO 1	
		Z	θ	Z	θ
Relé 2-3	BUS 18	42,6	82,4°	34,0	83,9°
Relé 11-6	BUS 5	15,7	84,4°	13,5	87,5°
Relé 16-17	BUS 18	23,8	84,9°	20,5	85,3°
Relé 19-16	BUS 21	65,4	74,2°	71,7	99,3°

Tabla 7. Impedancias vistas por el relé, escenario 2.

IMPEDANCIA VISTA POR EL RELÉ					
RELÉ	LUGAR FALLA	CASO INICIAL		ESCENARIO 2	
		Z	θ	Z	θ
Relé 3-4	BUS 5	46,3	86,7°	40,3	84,8°
Relé 21-22	BUS 23	42,8	98,5°	28,3	86,6°
Relé 26-27	BUS 17	38,1	83,8°	38,1	83,6°
Relé 13-14	BUS 15	58,9	77,2°	38,2	85,1°

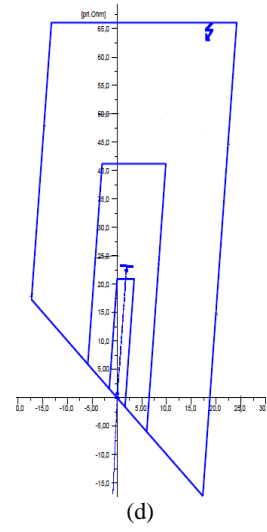
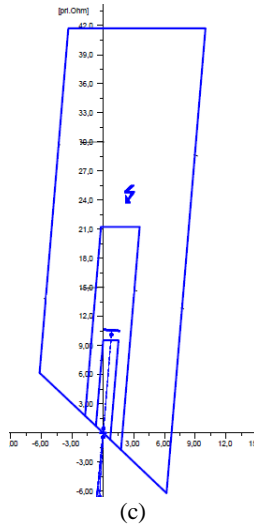
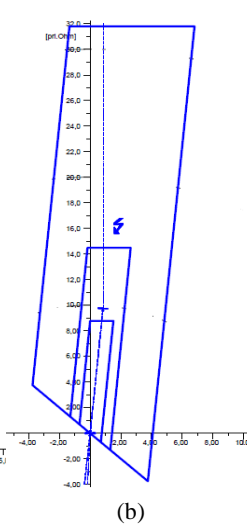
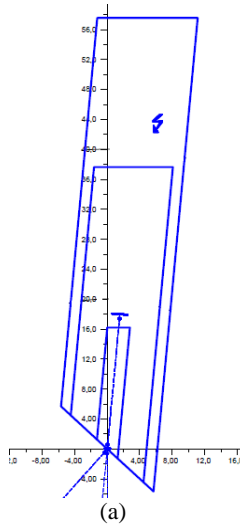
El cambio de topología del sistema varía la impedancia vista por el relé ante una falla, debido a que los voltajes y corrientes del sistema varían en magnitud y ángulo. Con el fin de constatar como el cambio de topología del sistema afecta la operación de las protecciones de distancia, en las figuras 13 y 14, se muestra cómo actúan los relés de distancia en las diferentes zonas de protección ante una falla en la barra de la línea adyacente a la línea donde se encuentran instalados los relés. Cada relé muestra tres gráficos de análisis, en el primer gráfico se observa las zonas de protección del relé al simular una falla cuando el sistema se encuentra en condiciones iniciales, en el segundo gráfico se muestra las mismas zonas de protección del relé al simular una falla en el mismo lugar, cuando el sistema cambia de topología, y en el tercer gráfico se muestra las zonas de protección del relé, ante una falla en el mismo sitio, después de la coordinación automática de protecciones, en la nueva topología del sistema. Como se puede observar en los gráficos, la coordinación automática de protecciones es indispensable, puesto que al variar la topología del sistema, las zonas de protección de los relés también deben ajustarse al nuevo sistema, y despejar las fallas en el sistema sin problemas de sobre-alcance o sub-alcance.

En la figura 13, se observa como al simular una falla en la barra de la línea adyacente a la línea donde se encuentran instalados los relés, para el sistema en condiciones iniciales, los cuatro relés de distancia a analizar actúan en la zona 3 de protección, mientras que al acontecer una contingencia extrema que provoca el cambio de topología del sistema, tal como lo plantea el escenario 1 y al simular una falla en el mismo lugar con los relés de distancia ajustados de igual forma que el sistema en condiciones iniciales, se puede observar que el relé 19-16 no actúa, puesto que la

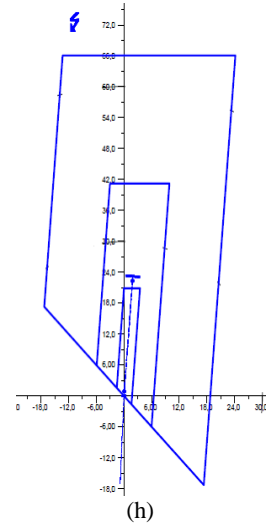
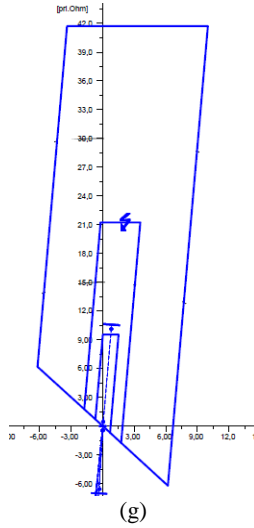
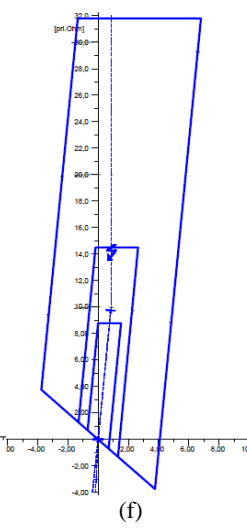
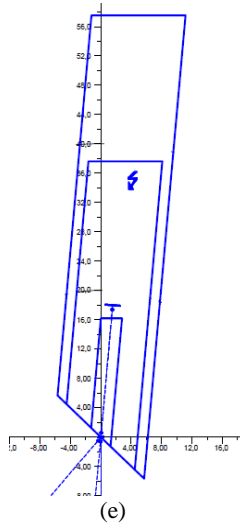
impedancia aparente vista por el relé se encuentra fuera de sus zonas de protección, mientras que los demás relés que se analizan actúan en la zona 2 de protección, después de realizar una coordinación automática de las protecciones de distancia con la nueva topología del sistema y al simular una falla en el mismo lugar, se puede observar que los 4 relés que se analizan actúan y despejan la falla en la zona 3 de protección.

Al igual que el caso anterior, en la figura 14 se muestra como al simular una falla, en la barra de la línea adyacente a la línea de transmisión donde se encuentran instalados los relés a analizar para el sistema de transmisión en condiciones iniciales, los cuatro relés de distancia actúan en la zona 3 de protección, cuando sucede una contingencia extrema que ocasiona el cambio de topología del sistema tal como se plantea en el escenario 2, y al simular una falla en el mismo sitio con los relés de distancia ajustados de igual forma que el sistema en condiciones iniciales, se puede observar que el relé 26-27 aun actúa en la zona 3 de protección, ya que la impedancia aparente vista por el relé es prácticamente la misma que cuando el sistema se encontraba en condiciones iniciales, debido a que no existe presencia de fuentes intermedias entre la barra donde se simula la falla y la barra donde se encuentra instalado el relé, los demás relés que se analizan actúan en la zona 2 de protección, una vez realizada la coordinación automática de protecciones se observa como los relés de distancia que se analizan despejan la falla correctamente en la zona 3 de protección. Mediante los gráficos se puede observar, que la coordinación automática de protecciones de distancia, es indispensable puesto que permite despejar las diferentes fallas en el sistema de transmisión, de forma correcta.

Coordinación inicial.



Ajuste inicial después de la contingencia.



Coordinación automática en la nueva topología.

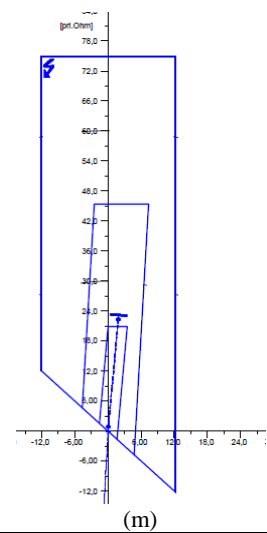
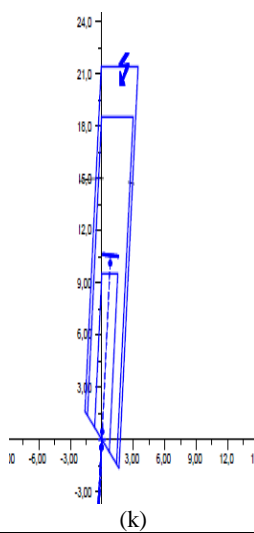
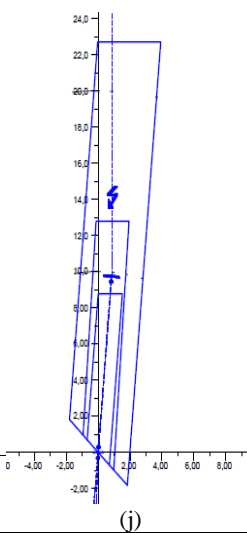
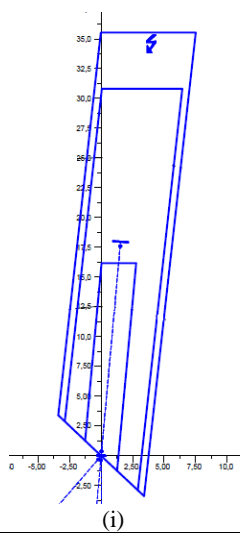


Figura 13. Impedancia vista por los relés ante una falla, escenario 1.

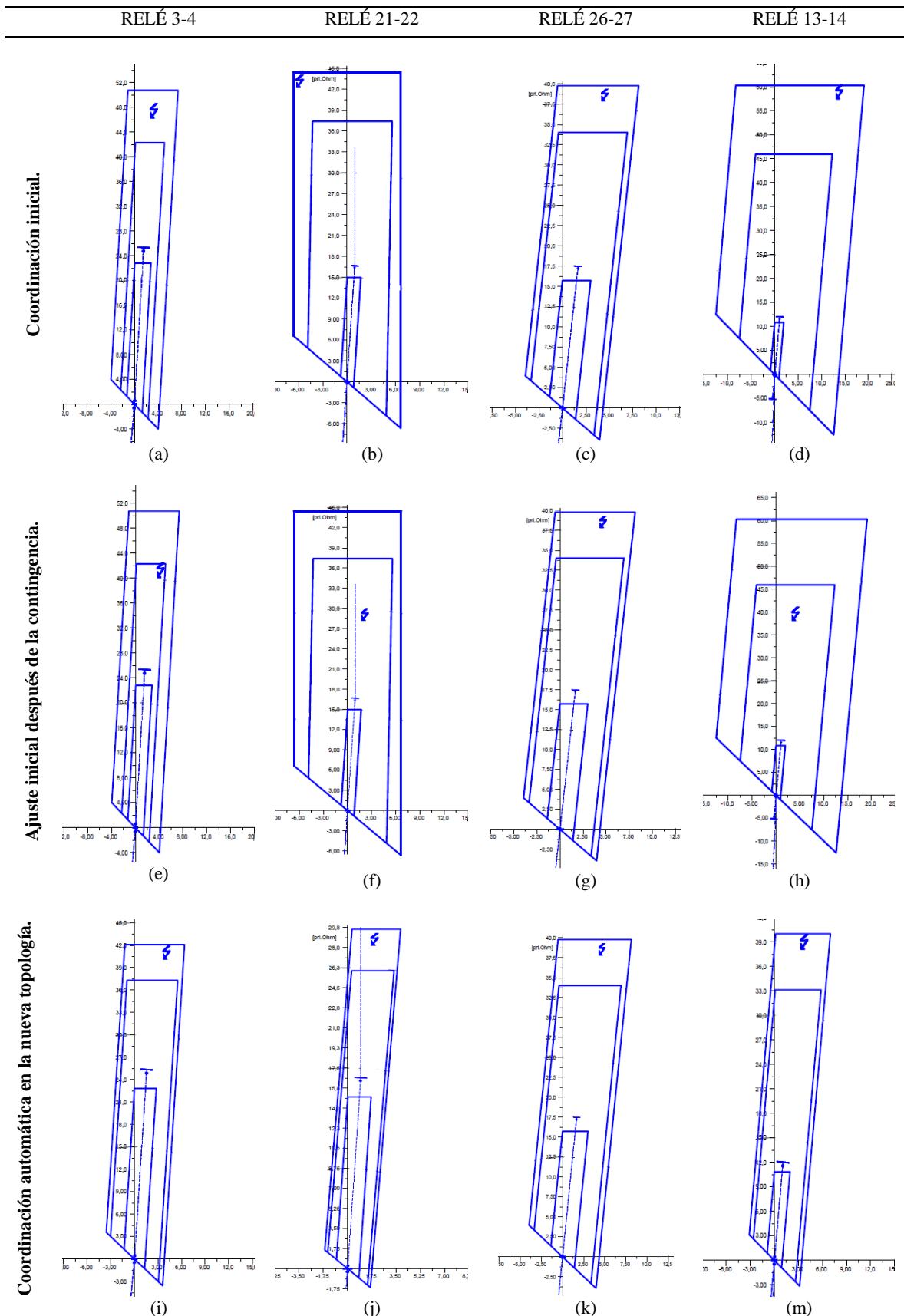


Figura 14. Impedancia vista por los relés ante una falla, escenario 2.

6 Conclusiones

Cuando existe un cambio de topología en el sistema debido a una contingencia extrema, únicamente varían los ajustes de las zonas 2 y 3 de las protecciones de distancia, puesto que en la metodología implementada el ajuste de la zona 1 depende exclusivamente de la impedancia de secuencia positiva de la línea de transmisión donde se encuentra instalado el relé.

La metodología implementada es considerada un sistema de protección no piloto, puesto que no existen enlaces de comunicación entre los relés de distancia ubicados en los extremos de cada línea de transmisión.

Los ajustes de las zonas 2 y 3 de los relés de distancia son similares cuando no existe una línea adyacente a la línea donde se encuentra instalado el relé, puesto que para estos casos, el ajuste de las zonas 2 y 3 protegen únicamente el 100% de la línea donde se encuentra instalado el relé.

Los algoritmos utilizados para coordinar automáticamente las protecciones de distancia frente a una contingencia extrema, cumplen con el objetivo planteado de reestablecer la sensibilidad, selectividad y confiabilidad de los relés de distancia.

7 Trabajos futuros

Se recomienda realizar futuras investigaciones relacionadas a la coordinación automática de protecciones de distancia, cuando el sistema adopte una nueva topología, tomando en cuenta la cargabilidad de las líneas de transmisión, puesto que al modificarse la topología del sistema, la corriente que circula por los conductores varía, lo que puede ocasionar que existan líneas de

transmisión sobrecargadas. Adicionalmente, se recomienda realizar la coordinación automática de protecciones de distancia, para fallas a tierra tomando en cuenta el factor de compensación residual k_0 .

8 Referencias

- [1] T. Ackermann, "Distributed generation : a definition," vol. 57, pp. 195–204, 2001.
- [2] G. Ziegler, Numerical distance protection. .
- [3] A. Valenzuela, I. Montalvo, and C. Barrera-singa, "Electrical Vehicle : Facing Future Challenges in Quito," 2017.
- [4] E. Wladimir and Q. Carrera, "Efecto de la inducción electromagnética de circuitos paralelos en la operación de las protecciones eléctricas.," 2013.
- [5] M. Tasdighi, S. Member, and M. Kezunovic, "Automated Review of Distance Relay Settings Adequacy After the Network Topology Changes," vol. 31, no. 4, pp. 1873–1881, 2016.
- [6] H. . El-Tamaly and A. H. M. El Sayed, "A New Technique For Setting Calculation Of Digital Distance Relays," Mepcon 2006, pp. 135–139.
- [7] T. Penthong and K. Hongesombut, "An efficient method of automatic distance relay settings for transmission line protection," 2013 IEEE Int. Conf. IEEE Reg. 10 (TENCON 2013), pp. 1–4, 2013.
- [8] S. García and J. Jiménez, "Pruebas de relevadores de distancia empleando un simulador," 2012.
- [9] V. De Andrade, "Ajuste óptimo-probabilístico del alcance de relés de distancia," 2008.
- [10] T. S. Sidhu, D. S. Baltazar, R. M.

- Palomino, and M. S. Sachdev, "A New Approach for Calculating Zone-2 Setting of Distance Relays and Its Use in an Adaptive Protection System," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 70–77, 2004.
- [11] M. Lukowicz, J. Magott, and T. Babczyn, "Time Coordination of Distance Protections Using Probabilistic Fault Trees With Time Dependencies," vol. 25, no. 3, pp. 1402–1409, 2010.
- [12] B. Ravikumar, D. Thukaram, S. Member, H. P. Khincha, and S. Membor, "An Approach for Distance Relay Co-ordination using Support Vector Machines," pp. 1–6, 1996.
- [13] E. David, "Metodología de ajuste de protecciones tipo impedancia ante fenómenos oscilatorios de generadores sincrónicos."
- [14] S. Li, M. Ding, N. Yorino, and Y. Zoka, "Operation Condition for Zone 3 Impedance Relays during Low-Frequency Power Swings," no. April, pp. 2316–2321, 2008.
- [15] D. Kang and R. Gokaraju, "A New Method for Blocking Third-Zone Distance Relays during Stable Power Swings," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 4, pp. 1836–1843, 2016.
- [16] A. Farid and B. Abidin, "Adaptive Settings of Distance Protection to Prevent Mal-operation under Severe Voltage Fluctuation," pp. 162–165, 2011.
- [17] D. Dwivedi, N. Singh, and S. Member, "A Wavelet Based Approach for Classification and Location of Faults in Distribution Systems."
- [18] W. D. Grainger, J. John, and J. Stevenson, "Power system analysis."
- [19] T. S. Sidhu, D. S. Ghotra, and M. S. Sachdev, "A fast distance relay using adaptive data window filters," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 3, no. c, pp. 1407–1412, 2000.
- [20] G. Cablea, P. Granjon, and C. Bérenguer, "Three-phase electrical signals analysis for mechanical faults monitoring in rotating machine systems," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 92, pp. 278–292, 2017.
- [21] C. Barrera-singaña, "Dynamic Control Modelling of a Bipole Converter Station in a Multi-Terminal HVDC Grid," 2017.
- [22] E. J. Holmes, *Protection of Electricity Distribution Networks*.
- [23] W. Orlando and F. Quilca, "Estudio de ajuste y coordinación de protecciones con reles digitales IED," 2008.
- [24] A. Brandolini, M. Faifer, S. Member, and R. Ottoboni, "A Simple Method for the Calibration of Traditional and Electronic Measurement Current and Voltage Transformers," vol. 58, no. 5, pp. 1345–1353, 2009.
- [25] C. Luna, "Frequency Domain Simulation of Fault Transients in Transmission Lines Including Measurement Transformers," no. 1, 2014.
- [26] L.-C. Wu, C.-W. Liu, and C.-S. Chen, "Modeling and testing of a digital distance relay MATLAB/SIMULINK," *Proc. 37th Annu. North Am. Power Symp. 2005.*, pp. 253–259, 2005.
- [27] A. A. Chávez, J. L. Guardado, and D. S. E. Melgoza, "Coordinación de protecciones de distancia utilizando métodos de búsqueda," vol. 6, no. 1, 2008.
- [28] T. S. Sidhu, "High-speed backup scheme for zone 2 of non-pilot distance relays," no. 6, pp. 938–947, 2007.
- [29] N. A. Al-emadi, A. Ghorbani, and H. Mehrjerdi, "Synchrophasor-

- based backup distance protection of multi-terminal transmission lines,” vol. 10, pp. 3304–3313, 2016.
- [30] M. Pazoki, Z. Moravej, M. Khederzadeh, and N. K. C. Nair, “Distance Protection of Transmission Line with Infeed Based on Real-Time Simulator,” no. October, pp. 1–5, 2014.
 - [31] M. M. Saba, J. Izykowski, E. Rosolowskitt, M. Bozek, and A. B. B. Ab, “Adaptive line distance protection with compensation for remote end infeed,” pp. 321–326.
 - [32] R. Alves and J. Nuñez, “Adaptive Distance Protection with Compensation for Remote Infeed Effect,” vol. 3.
 - [33] P. C. Pietramala, E. Power, S. Studies, M. Alla, and B. K. Johnson, “Distance Element Corrective Biasing During Remote Infeed Conditions,” 2016.

9 Matriz estado del arte

Tabla 8. Matriz estado del arte.

COORDINACIÓN AUTOMÁTICA DE PROTECCIONES DE DISTANCIA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE A UNA CONTINGENCIA EXTREMA																																
DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA						PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA								SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	ANÁLISIS DE FALLAS	SISTEMA ELÉCTRICO DE TRANSMISIÓN	CONTINGENCIAS EXTREMAS	CAMBIO DE TOPOLOGÍA EN EL SISTEMA	IMPEDANCIA APARENTE VISTA POR EL RELÉ	COORDINACIÓN PROTECCIONES DE DISTANCIA	NO DESPEJE DE FALLAS	DESCOORDINACIÓN DE LOS RELÉS DE DISTANCIA	ACTUACIONES INDESEADAS DE LOS RELÉS	INESTABILIDAD DEL SISTEMA	TOPOLOGÍA DEL SISTEMA	SOBRE-ALCANCES DE LOS RELÉS	SUB-ALCANCES DE LOS RELÉS	TIPO DE RELÉ DE DISTANCIA	CARGABILIDAD DE LA RED	EFFECTO INFEED	ZONAS DE AJUSTE MEDIANTE ALGORITMOS MATEMÁTICOS	AJUSTES DE PROTECCIONES ANTE OSCILACIONES DE POTENCIA	CALCULO IMPEDANCIAS DE FALLA	AJUSTES RELÉS DE DISTANCIA VARIACIONES DE VOLTAJE	METODOLOGÍA PARA CALCULAR LAS TRES ZONAS DE AJUSTE	ANÁLISIS DE LOS CAMBIO DE TOPOLOGÍA EN EL SISTEMA	CALCULO AJUSTES CON FUENTES INTERMEDIAS O REMOTAS	IMPLEMENTACION DE SOFTWARES PARA EL CALCULO DE AJUSTES	CALCULO EFFECTO INFEED	ALGORITMOOS DE CALCULO DE LA IMPEDANCIA APARENTE	COORDINACION AUTOMATICA RELÉS DE DISTANCIA	CALCULO ZONAS DE AJUSTE MEDIANTE METODOS DE BUSQUEDA		
1	2014	Frequency Domain Simulation of Fault Transients in Transmission Lines Including Measurement Transformers	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	
2	2016	Synchrophasor-Based Backup Distance Protection of Multi-terminal Transmission Lines	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖
3	2017	Adaptive Distance Protection with Compensation for Remote Infeed Effect	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□
4	2008	Ajuste Óptimo-probabilístico del Alcance de Relés de Distancia	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖
5	2009	A Simple Method for the Calibration of Traditional and Electronic Measurement Current and Voltage Transformers	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□
6	2017	Three-phase Electrical Signals Analysis for Mechanical Faults Monitoring in Rotating Machine Systems	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□
7	2008	Coordinación de Protecciones de Distancia Utilizando Métodos de Búsqueda	✖	□	✖	✖	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	✖	✖	□	□	✖	✖	✖	□	□	□	✖	✖	✖	□	✖	✖	✖	□	□
8	2006	Application of Combined Adaptive Fourier Filtering Technique and Fault Detector to Fast Distance Protection	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
9	2011	Metodología de Ajuste de Protecciones Tipo Impedancia Ante Fenómenos Oscilatorios De Generadores Sincrónicos	□	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

COORDINACIÓN AUTOMÁTICA DE PROTECCIONES DE DISTANCIA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE A UNA CONTINGENCIA EXTREMA

	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA					PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA								SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	ANÁLISIS DE FALLAS	SISTEMA ELÉCTRICO DE TRANSMISIÓN	CONTINGENCIAS EXTREMAS	CAMBIO DE TOPOLOGÍA EN EL SISTEMA	IMPEDANCIA APARENTE VISTA POR EL RELÉ	COORDINACIÓN PROTECCIONES DE DISTANCIA	NO DESPEJE DE FALLAS	DESCOORDINACIÓN DE LOS RELÉS DE DISTANCIA	ACTUACIONES INDESEADAS DE LOS RELÉS	INESTABILIDAD DEL SISTEMA	TOPOLOGÍA DEL SISTEMA	SOBRE-ALCANCES DE LOS RELÉS	SUB-ALCANCES DE LOS RELÉS	TIPO DE RELÉ DE DISTANCIA	CARGABILIDAD DE LA RED	EFFECTO INFEED	ZONAS DE AJUSTE MEDIANTE ALGORITMOS MATEMÁTICOS	AJUSTES DE PROTECCIONES ANTE OSCILACIONES DE POTENCIA	CALCULO IMPEDANCIAS DE FALLA	AJUSTES RELÉS DE DISTANCIA VARIACIONES DE VOLTAJE	METODOLOGÍA PARA CALCULAR LAS TRES ZONAS DE AJUSTE	ANÁLISIS DE LOS CAMBIO DE TOPOLOGIA EN EL SISTEMA	CALCULO AJUSTES CON FUENTES INTERMEDIAS O REMOTAS	IMPLEMENTACION DE SOFTWARES PARA EL CALCULO DE AJUSTES	CALCULO EFECTO INFEED	ALGORITMOOS DE CALCULO DE LA IMPEDANCIA APARENTE	COORDINACION AUTOMATICA RELÉS DE DISTANCIA	CALCULO ZONAS DE AJUSTE MEDIANTE METODOS DE BUSQUEDA		
10	2008	A Wavelet Based Approach for Classification and Location of Faults in Distribution Systems	✖	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□
11	2006	A New Technique For Setting Calculation Of Digital Distance Relays	□	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□
12	2011	Adaptive Settings of Distance Protection to Prevent Mal-operation under Severe Voltage Fluctuation	□	□	□	□	□	✖	□	□	✖	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
13	2012	Pruebas de Relevadores de Distancia Empleando un Simulador	□	□	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□
14	1994	Power System Analysis	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	✖	□	✖	□	□	✖	□	✖	✖	□	□	□	□	□	✖	□	✖
15	2004	Aplicación de Redes Neuronales Artificiales en la Protección de Distancia en Líneas de Transmisión	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□
16	2011	Protection of Electricity Distribution Networks	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
17	2016	A New Method for Blocking Third-Zone Distance Relays during Stable Power Swings	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
18	2008	Operation Condition for Zone 3 Impedance Relays during Low-Frequency Power Swings	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	✖	✖	□	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

COORDINACIÓN AUTOMÁTICA DE PROTECCIONES DE DISTANCIA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE A UNA CONTINGENCIA EXTREMA

DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA						PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA								SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	ANÁLISIS DE FALLAS	SISTEMA ELÉCTRICO DE TRANSMISIÓN	CONTINGENCIAS EXTREMAS	CAMBIO DE TOPOLOGÍA EN EL SISTEMA	IMPEDANCIA APARENTE VISTA POR EL RELÉ	COORDINACIÓN PROTECCIONES DE DISTANCIA	NO DESPEJE DE FALLAS	DESCOORDINACIÓN DE LOS RELÉS DE DISTANCIA	ACTUACIONES INDESEADAS DE LOS RELÉS	INESTABILIDAD DEL SISTEMA	TOPOLOGÍA DEL SISTEMA	SOBRE-ALCANCES DE LOS RELÉS	SUB-ALCANCES DE LOS RELÉS	TIPO DE RELÉ DE DISTANCIA	CARGABILIDAD DE LA RED	EFEECTO INFEED	ZONAS DE AJUSTE MEDIANTE ALGORITMOS MATEMÁTICOS	AJUSTES DE PROTECCIONES ANTE OSCILACIONES DE POTENCIA	CÁLCULO IMPEDANCIAS DE FALLA	AJUSTES RELÉS DE DISTANCIA VARIACIONES DE VOLTAJE	METODOLOGÍA PARA CALCULAR LAS TRES ZONAS DE AJUSTE	ANÁLISIS DE LOS CAMBIO DE TOPOLOGÍA EN EL SISTEMA	CÁLCULO AJUSTES CON FUENTES INTERMEDIAS O REMOTAS	IMPLEMENTACION DE SOFTWARES PARA EL CÁLCULO DE AJUSTES	CÁLCULO EFECTO INFEED	ALGORITMOS DE CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA APARENTE	COORDINACION AUTOMÁTICA RELÉS DE DISTANCIA	CÁLCULO ZONAS DE AJUSTE MEDIANTE MÉTODOS DE BÚSQUEDA		
19	2010	Time Coordination of Distance Protections Using Probabilistic Fault TreesWith Time Dependencies	✖	✖	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□
20	2001	Distributed generation: a definition	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
21	2018	Investigating Particularities of Infeed and Fault Resistance Effect on Distance Relays Protecting Radial Distribution Feeders With DG	□	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	✖	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□
22	2008	Estudio de Ajuste y Coordinación de Potecciones con Relés Digitales IED	□	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
23	2014	Distance Protection of Transmission Line with Infeed Based on Real-Time Simulator	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	✖	✖	□	✖	□	□
24	2013	An Efficient Method of Automatic Distance Relay Settings for Transmission Line Protection	□	□	✖	✖	□	✖	□	✖	□	□	✖	□	□	□	□	□	✖	✖	□	□	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	✖	✖
25	2016	Distance Element Corrective Biasing During Remote Infeed Conditions	✖	✖	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□
26	1996	An Approach for Distance Relay Co-ordination using Support Vector Machines	□	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖
27	2008	Adaptive Line Distance Protection with Compensation For Remote End Infeed	✖	□	□	□	□	✖	□	□	□	□	✖	✖	✖	□	□	□	□	✖	□	✖	□	□	□	□	□	□	✖	□	□	□

COORDINACIÓN AUTOMÁTICA DE PROTECCIONES DE DISTANCIA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN FRENTE A UNA CONTINGENCIA EXTREMA

DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA								SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	ANÁLISIS DE FALLAS	SISTEMA ELÉCTRICO DE TRANSMISIÓN	CONTINGENCIAS EXTREMAS	CAMBIO DE TOPOLOGÍA EN EL SISTEMA	IMPEDANCIA APARENTE VISTA POR EL RELÉ	COORDINACIÓN PROTECCIONES DE DISTANCIA	NO DESPEJE DE FALLAS	DESCOORDINACIÓN DE LOS RELÉS DE DISTANCIA	ACTUACIONES INDESEADAS DE LOS RELÉS	INESTABILIDAD DEL SISTEMA	TOPOLOGÍA DEL SISTEMA	SOBRE-ALCANCES DE LOS RELÉS	SUB-ALCANCES DE LOS RELÉS	TIPO DE RELÉ DE DISTANCIA	CARGABILIDAD DE LA RED	EFFECTO INFEED	ZONAS DE AJUSTE MEDIANTE ALGORITMOS MATEMÁTICOS	AJUSTES DE PROTECCIONES ANTE OSCILACIONES DE POTENCIA	CÁLCULO IMPEDANCIAS DE FALLA	AJUSTES RELÉS DE DISTANCIA VARIACIONES DE VOLTAJE	METODOLOGÍA PARA CALCULAR LAS TRES ZONAS DE AJUSTE	ANÁLISIS DE LOS CAMBIO DE TOPOLOGÍA EN EL SISTEMA	CÁLCULO AJUSTES CON FUENTES INTERMEDIAS O REMOTAS	IMPLEMENTACION DE SOFTWARES PARA EL CÁLCULO DE AJUSTES	CÁLCULO EFFECTO INFEED	ALGORITMOOS DE CÁLCULO DE LA IMPEDANCIA APARENTE	COORDINACION AUTOMATICA RELÉS DE DISTANCIA	CÁLCULO ZONAS DE AJUSTE MEDIANTE METODOS DE BUSQUEDA		
28	2007	High-Speed Backup Scheme for Zone 2 of Non-pilot Distance Relays	☐	☐	☐	☐	✖	✖	☐	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐	☐	☐	✖	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	✖
29	2000	A Fast Distance Relay using Adaptive Data Window Filters	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐	☐	✖	☐	✖	☐	☐	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	✖	✖
30	2004	A New Approach for Calculating Zone-2 Setting of Distance Relays and Its Use in an Adaptive Protection System	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐	✖	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐
31	2016	Automated Review of Distance Relay Settings Adequacy After the Network Topology Changes	☐	✖	☐	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	✖	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
32	2013	Efecto de la Inducción Electromagnética de Circuitos Paralelos en la Operación de las Protecciones Eléctricas.	✖	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐	✖	☐	☐	✖	✖	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
33	2005	Modeling and Testing of a Digital Distance Relay MATLAB/SIMULINK	☐	☐	☐	✖	☐	☐	☐	☐	✖	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	✖	☐	☐	☐	☐	✖
			1	1	1	2	1	3	1	2	4	0	2	1	1	2	0	0	1	0	1	0	3	2	1	1	0	0	3	3		

9.1 Resumen de indicadores

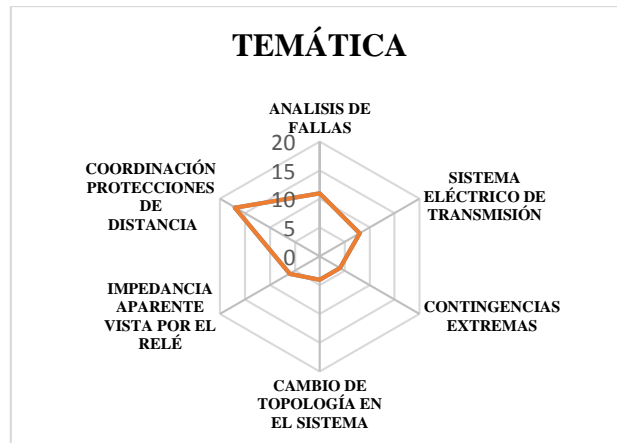


Figura 15. Resumen e indicador de la temática- Estado del arte

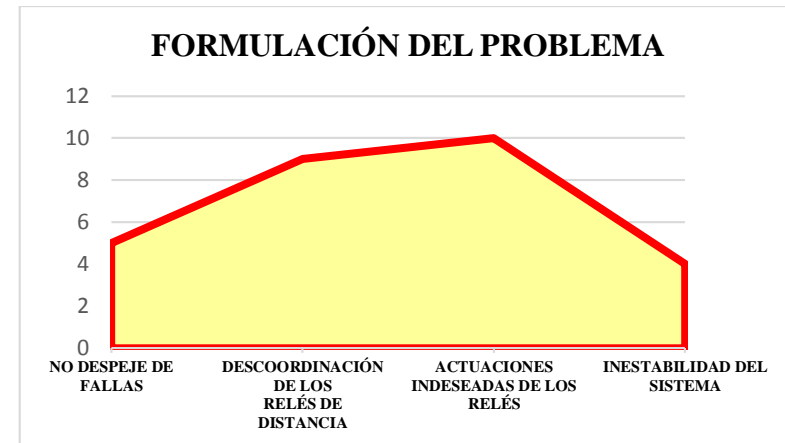


Figura 16. Indicador de formulación de problema- Estado del arte

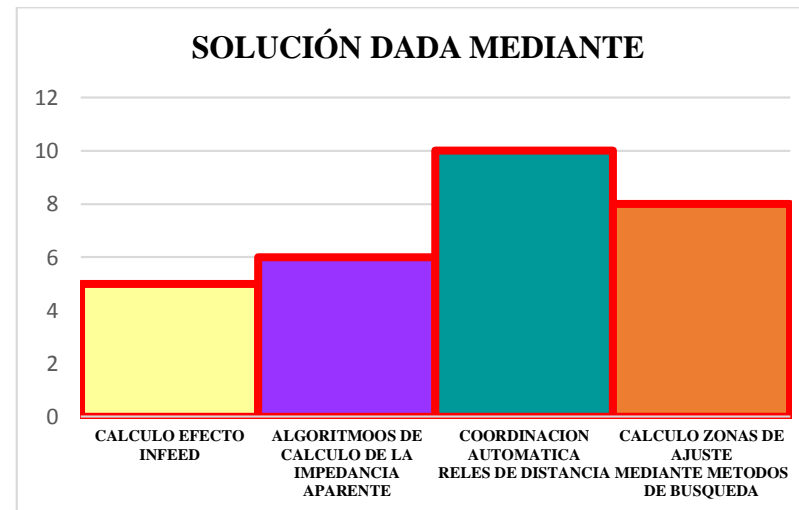


Figura 17. Indicador de solución- Estado del arte.